Capítulo 9

Sensores de humedad y punto de rocío

La humedad es una variable de gran importancia en la industria, no sólo porque muchos procesos deben ser ejecutados bajo condiciones controladas de humedad, sino porque ella afecta la calidad de muchos productos y la seguridad de las personas. En este capítulo se examinan los conceptos básicos relacionados con la humedad y las principales tecnologías de sensores utilizadas para su medición.

Generalidades

La **humedad**, definida como la cantidad de vapor de agua presente en un gas o de agua impregnada o absorbida por un cuerpo, determina la calidad de muchos procesos y productos industriales. Por ejemplo, en ciertos procesos textiles, **figura 9.1**, la banda de material textil debe pasar a través de una cámara de humectación para humedecerla y suavizarla. La humedad de la cámara se mantiene rociando agua en un conducto por el que circula aire; se monitorea mediante un sensor de humedad y se regula mediante una válvula proporcional en la línea de suministro de agua. El sensor de humedad es necesario, puesto que la tira textil, al entrar seca y salir mojada de la cámara, remueve constantemente vapor de agua del aire.

Otro parámetro importante relacionado con la humedad es el **punto de rocío**, referido a la temperatura a la cual se produce la condensación del

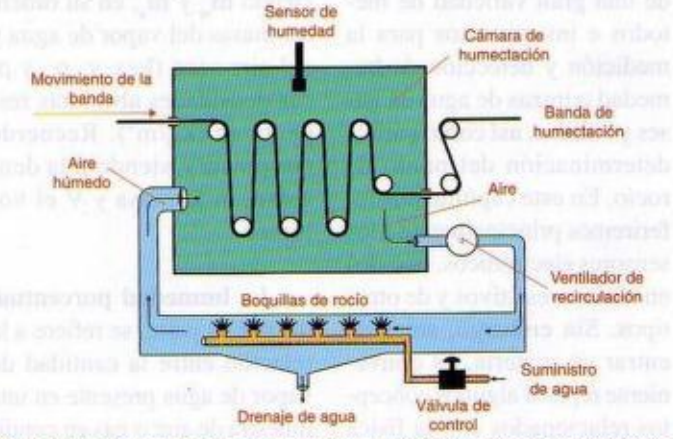

Figura 9.1 La humedad juega un papel clave en muchos procesos y operaciones industriales, como este sistema de humectación de bandas textiles.

Figura 9.2 Instrumentos y sensores para la medición de humedad

vapor de agua. Aunque algunas veces los efectos negativos del rocío, como la formación de moho u orín, pueden ser minimizados colocando una cubierta de protección sobre la superficie expuesta, existen muchas situaciones donde esto no es posible. En los sistemas de calefacción, por ejemplo, el rocío puede formar depósitos de agua estancada en el fondo de los ductos, los cuales actúan como incubadores de hongos, moho y microorganismos causantes de enfermedades.

Actualmente se dispone de una gran variedad de métodos e instrumentos para la medición y detección de humedad o trazas de agua en gases y sólidos, así como para la determinación del punto de rocío. En este capítulo nos referiremos principalmente a los sensores electrónicos, basados en efectos resistivos y de otros tipos. Sin embargo, antes de entrar en materia, es conveniente repasar algunos conceptos relacionados con la física de la humedad.

Conceptos básicos

La cantidad de vapor de agua contenida en el aire o un gas, bajo determinadas condiciones de temperatura y presión, se expresa normalmente en una de estas tres formas: humedad absoluta, porcentaje de humedad o humedad relativa. La **humedad absoluta** o **específica** (ω) se refiere a la masa de vapor de agua presente en una masa dada de aire o gas. Se especifica en kilogramos por kilogramo (kg/kg) y se evalúa así:

$$\omega = m_w/m_a = \rho_w/\rho_a$$

siendo $\mathbf{m_w}$ y $\mathbf{m_a}$, en su orden, las masas del vapor de agua y del aire seco (kg), y ρ_w y ρ_a sus densidades absolutas respectivas (kg/m^3). Recuerde que $\rho = m/V$, siendo ρ la densidad, m la masa y V el volumen.

La **humedad porcentual** (μ) por su parte, se refiere a la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en una muestra de aire o gas en condiciones reales, es decir la humedad absoluta (ω), y la cantidad máxima de vapor de agua que puede contener la misma muestra antes de colapsar, es decir la **humedad de saturación** (ω_{sat}). Se expresa como un porcentaje. Por tanto:

$$\mu = (\omega/\omega_{sat}) \times 100$$

En general, el punto de saturación del vapor de agua se incrementa a medida que aumenta la temperatura del aire, y disminuye a medida que se incrementa la presión.

Finalmente, la **humedad relativa** o RH (*relative humidity*), que representaremos como ϕ, se refiere a la relación entre la presión parcial del vapor de agua (Pw) a una temperatura dada (To) y la presión total del mismo en condiciones de saturación (Psat), a la misma temperatura. Se expresa como un porcentaje y es numéricamente igual al porcentaje de humedad. Esto es:

$$\phi = (P_w/P_{sat}) \times 100$$
$$= (\rho_w/\rho_{sat}) \times 100$$

Siendo ρ_w y ρ_{sat} la densidad del vapor de agua en condiciones normales y de saturación, respectivamente. Las presiones Pw y Psat se expresan generalmente en milibares. La humedad relativa es la forma más común de expresar el contenido de vapor de agua en una muestra de aire o gas.

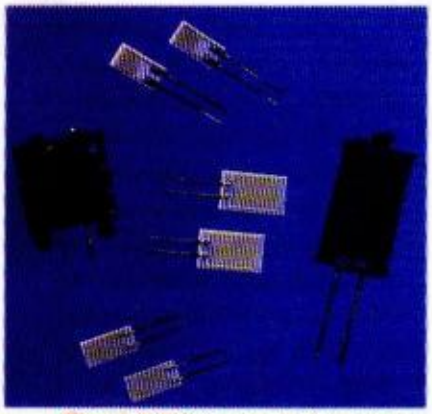

Figura 9.3 Sensores de humedad resistivos y capacitivos de bajo costo. Los mostrados en la fotografía son fabricados por General Eastern (www.geinet.com)

Tipos de sensores de humedad

Actualmente se dispone de varias tecnologías de sensores de humedad, la mayoría basadas en la tendencia de ciertos materiales a cambiar sus propiedades físicas o eléctricas de una manera predecible cuando varía su contenido de vapor de agua. Éstas incluyen principalmente sensores mecánicos, resistivos, cerámicos, capacitivos, poliméricos, de condensación en espejo, criogénicos, de temperatura dual, monolíticos, etc.

Los **sensores mecánicos** están basados en el efecto que tiene la absorción de agua sobre las propiedades físicas de ciertos materiales, principalmente la longitud o la masa. Por ejemplo, algunos tipos de fibras, como el cabello humano o el nylon, se expanden o contraen cuando absorben agua. En este principio se basan los **humistatos** o interruptores controlados por humedad. La precisión de este tipo de instrumentos es del orden del ±3% al ±5% y pueden medir niveles de humedad relativa desde el 19% hasta el 95%. Los medidores de humedad basados en cambios de longitud se denominan genéricamente **higrómetros de extensión**, y los basados en cambios de masa **higrómetros de absorción**.

Los **sensores resistivos y capacitivos**, **figura 9.3**, se basan en la propiedad que presentan ciertos materiales aislantes de cambiar su resistividad y/o su constante dieléctrica de acuerdo a su contenido de humedad. Si se mide la variación de su resistencia, se tiene un higrómetro resistivo o **humistor**. Si se mide la variación de capacitancia, se tiene un higrómetro capacitivo.

Lo **sensores resistivos** están formados generalmente por dos electrodos de cinta metálica realizados en forma de zigzag sobre una forma de plástico (sustrato) y aislados eléctricamente entre sí, **figura 9.4**. Todo el conjunto está recubierto por una solución acuosa de cloruro de litio (LiCl) u otro tipo de sal higroscópica (F_2B_a, P_2O_5, etc). Esta sal tiene la propiedad de variar considerablemente su resistencia al aumentar o disminuir la humedad ambiente, ya que libera o absorbe iones de la película metálica de soporte.

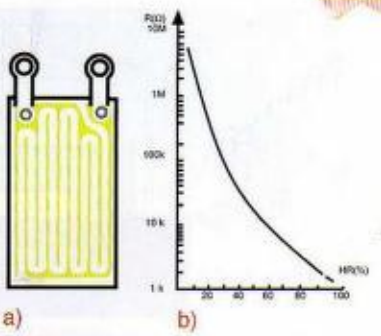

*Figura 9.4 Sensores de humedad resistivos. **(a)** Aspecto físico. **(b)** Variación de la resistencia en función de la humedad*

Este tipo de instrumentos ofrecen precisiones del ±2% al ±3%, y pueden medir humedades relativas desde el 5% hasta el 95%. No deben ser utilizados en atmósferas contaminadas con sal o polvo excesivo, ni ambientes de dióxido de azufre, vapores ácidos, amoníaco, cloro, vapores alcalinos, acetileno, óxido de etileno y otros gases. Tampoco deben exponerse a humedades relativas por encima de la máxima especificada por el fabricante.

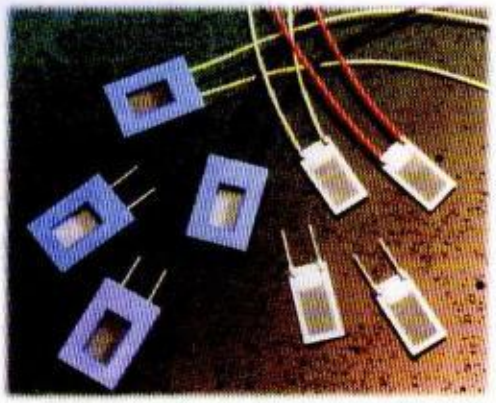

Figura 9.5 Sensores de humedad cerámicos. Los mostrados en la fotografía corresponden a la serie ERH 300 de Elmwood Sensors Inc. (www.elmwood sensors.com)

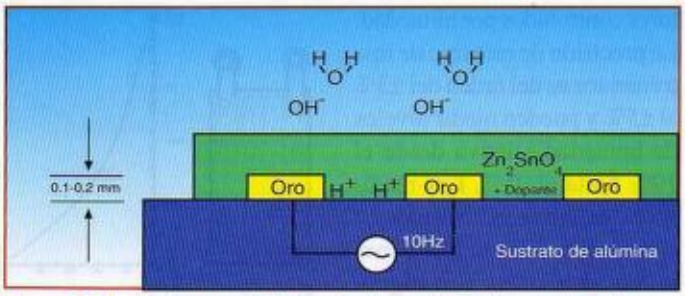

Figura 9.6 Estructura y principio de funcionamiento de un sensor de humedad cerámico

Una variante son los **sensores cerámicos**, formados por un sustrato de alúmina (Al_2O_3) impreso con huellas de oro y cubierto por una delgada capa de Zn_2SnO_4 dopado. Un ejemplo son los sensores de la serie **ERH 300**, **figura 9.5**, los cuales operan sobre un rango de humedades relativas del 10% al 90%. En la **figura 9.6** se ilustra la estructura interna y el principio de funcionamiento de este tipo de dispositivos.

En este caso, el dopante descompone las moléculas de agua depositadas sobre su superficie en iones H+ y OH-, variando su resistencia. Esta última puede fluctuar desde 25.6 MΩ (RH=10%) hasta 390Ω (RH=90%). Debido a que el dopante no requiere una absorción completa de agua y no degrada las propiedades dieléctricas, se garantizan un tiempo de respuesta muy corto y una larga vida útil.

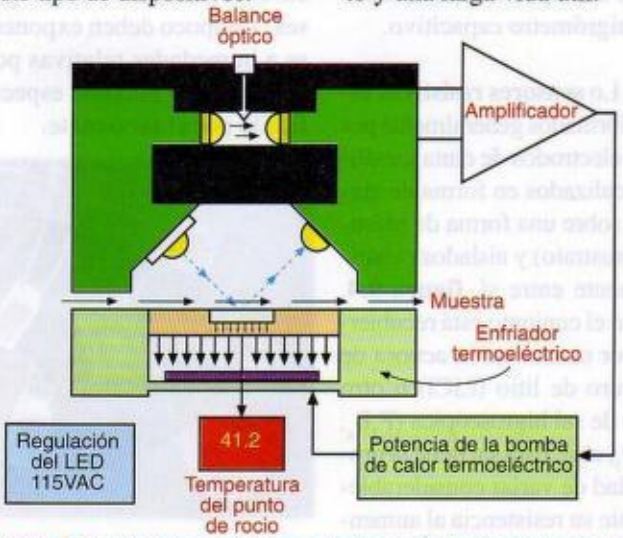

Figura 9.7. Estructura y principio de funcionamiento de un higrómetro de espejo empañado convencional. Típicamente, la superficie reflectiva del espejo es de cobre con un baño de oro o plata. Como enfriador se utiliza un módulo termoeléctrico. La fuente primaria de luz es un LED de alta intensidad.

Los **sensores capacitivos** detectan cambios en las propiedades dieléctricas de ciertos materiales inducidos por la presencia de humedad. Están formados por una película aislante con características higroscópicas (dieléctrico) recubierta de una capa metalizada sobre ambos lados. Las moléculas de vapor de agua absorbidas por la película cambian su constante dieléctrica, produciendo un cambio correspondiente en la capacitancia. Este tipo de dispositivos, que constituyen junto con los sensores resistivos y cerámicos una gran parte del mercado de los sensores de humedad, ofrecen niveles de precisión entre ±2% y ±15%, y miden humedades relativas desde el 0% hasta el 45%.

Los **sensores poliméricos** son similares en su construcción y forma a los sensores resistivos y cerámicos, pero se basan directamente en los cambios de resistividad del sustrato (un polímero) y no necesitan de una película higroscópica. Este comportamiento se consigue tratando químicamente la superficie de detección. El sustrato es generalmente una base de poliestireno tratada con ácido sulfúrico. Su exactitud es del orden del ±2% al ±10% y su rango de medición de humedad relativa se extiende desde menos del 30% hasta más del 90%.

Los **sensores de espejo empañado** (***chilled mirror***), **figura 9.7**, detectan humedad enfriando inicialmente la superficie reflectiva de un pequeño espejo hasta alcanzar el punto de rocío, es decir la formación de gotas de agua condensada sobre la misma. Simultáneamente, se dirige un haz de luz en dirección a la superficie empañada y se detecta mediante un sensor óptico la cantidad de luz reflejada. Esta última es alta cuando el espejo está seco, es decir, su temperatura superficial está por encima del punto de rocío, pero disminuye a medida que el agua formada en la superficie refracta luz. El incremento en la cantidad de luz refractada proporciona una medición precisa del incremento en la humedad.

Este tipo de higrómetros son muy precisos y, por la misma razón, costosos. Se utilizan principalmente como instrumentos de laboratorio y en aplicaciones industriales donde se requiere una gran exactitud. Sus principales dificultades son: la sensibilidad del espejo al polvo y otros contaminantes, lo cual afecta la lectura del detector; y el incremento significativo del tiempo de respuesta a temperaturas por debajo de -40ºC, el cual puede llegar a ser inclusive de varias horas.

Para solucionar este último inconveniente, se han desarrollado los llamados **higrómetros criogénicos**, **figura 9.8**, en los cuales el espejo se enfría inicialmente mediante nitrógeno líquido (LN_2) hasta que se forma una capa de condensación y luego se calienta hasta que se obtiene la capa de rocío o escarcha deseada. La temperatura a la cual esto sucede (punto de rocío o escarcha) se mide con un termistor y se controla electrónicamente.

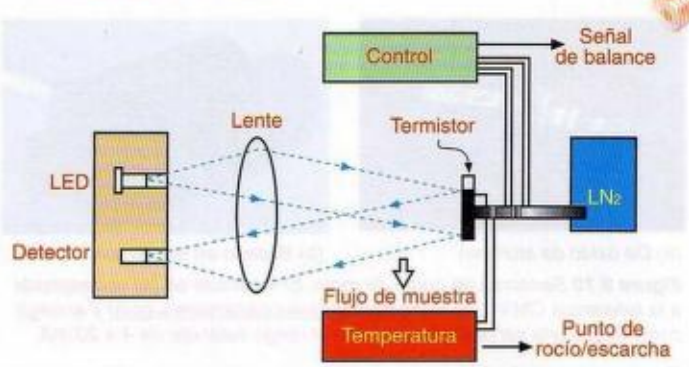

Figura 9.8 *Principio de funcionamiento de un higrómetro de espejo empañado criogénico. Este tipo de dispositivos proporcionan medidas muy rápidas y exactas de los puntos de rocío y escarcha, desde 30ºC hasta -105ºC y menos.*

También se dispone de higrómetros **monolíticos** o **integrados**, los cuales incluyen, en una misma cápsula, el sensor de humedad propiamente dicho y los circuitos de acondicionamiento de señales correspondientes. Un ejemplo es el **HIH-3605** de Honeywell, **figura 9.9**, el cual produce como salida un voltaje relacionado linealmente con la humedad relativa.

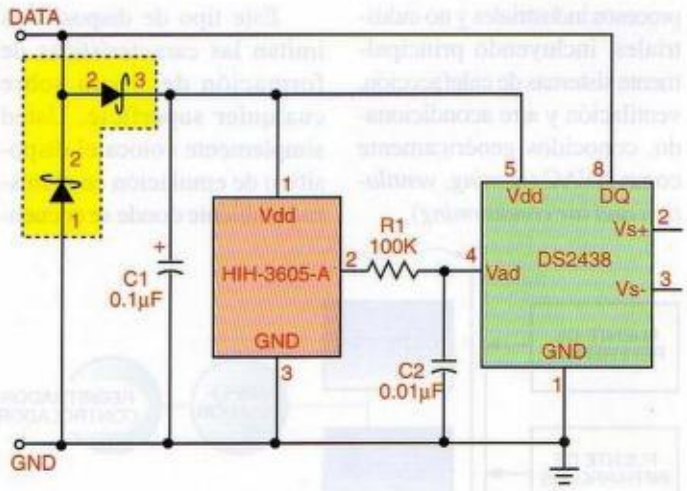

Figura 9.9 *Medidor de humedad relativa práctico, con sensor* ***HIH-3605****. Este último se alimenta con una tensión parásita de +5V derivada del bus 1-Wire y proporciona voltajes de salida DC en el rango de 0.8V a 3.9V, a medida que la humedad relativa varía desde el 0% hasta el 100%*

(a) De óxido de aluminio.

(b) Basado en emulación.

Figura 9.10 *Sensores de punto de rocío. El mostrado en* ***(a)*** *corresponde a la referencia CMX-1 de Panametrics (www.panametrics.com) y entrega como salida una señal de corriente en el rango estándar de 4 a 20 mA.*

Sensores de punto de rocío

El **punto de rocío** o *dew point* es la temperatura límite a la cual el vapor de agua existente en el aire o el gas bajo prueba se condensa o pasa al estado líquido. En otras palabras, es la temperatura a la cual la humedad relativa es del 100%, es decir, la presión del vapor de agua es igual a la presión de saturación. Por tanto, a la temperatura de punto de rocío, un gas está siempre saturado. Esta variable es de gran importancia en muchos procesos industriales y no industriales, incluyendo principalmente sistemas de calefaccción, ventilación y aire acondicionado, conocidos genéricamente como HVAC (*heating, ventilation and air conditioning*).

Para la medición y detección del punto de rocío se emplean sensores basados en principios similares a los de los sensores de humedad antes examinados, incluyendo películas poliméricas, sistemas de condensación en espejo, haces infrarrojos, sales higroscópicas y sustratos de óxido de aluminio, **figura 9.10a**. Otra alternativa es utilizar sensores basados en el principio de **emulación**, como el mostrado en la **figura 9.10b.**

Este tipo de dispositivos imitan las características de formación del rocío sobre cualquier superficie. Usted simplemente coloca el dispositivo de emulación en el mismo ambiente donde se encuentra la superficie de interés. Al mismo tiempo que las moléculas de agua comienzan a condensarse sobre esta última, lo mismo está sucediendo sobre la superficie del dispositivo de emulación. Una vez conseguida la emulación, como comprobación, se aplica una pequeña corriente a través del rocío en sus etapas tempranas de formación. La señal de respuesta se amplifica y se procesa para propósitos de medición, control o diagnóstico.

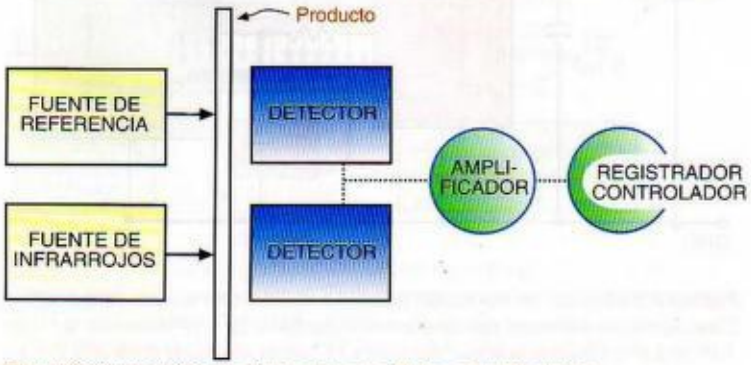

Figura 9.11 Medición de humedad en sólidos por infrarrojos

Medición de humedad en sólidos

Actualmente se dispone también de varios métodos para medir el contenido de agua en sólidos y materiales en estado granular, fibroso, etc., incluyendo el uso de sensores resistivos y capacitivos convencionales. Otro procedimiento común, particularmente adecuado para procesos industriales donde se manipulan y procesan tiras continuas de material (papel, textiles, etc.), es el **método infrarrojo**. En esta técnica, **figura 9.11**, una fuente principal y una fuente de referencia exploran mediante luz IR la superficie del material cuya humedad se desea medir. Dependiendo del contenido de humedad, una parte de esta radiación es absorbida por el agua contenida en el producto, mientras que la otra lo atraviesa. Midiendo esta última se determina la humedad relativa.